

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Сидоров А.А., Алимов А.И.
ООО «ТЕСИС»

При производстве деталей авиационной промышленности, ввиду того, что зачастую эти детали являются крайне ответственными, к их качеству предъявляются очень высокие требования. Компьютерное моделирование эволюции микроструктуры в процессе горячей штамповки таких деталей может представлять большой интерес и часто значительно способствует увеличению их качества.

Программное обеспечение DEFORMTM (разработчик компания SFTC, США) позволяет осуществлять моделирование рекристаллизационных процессов и роста зерна с использованием феноменологического подхода.

Необходимые параметры материала для подобного моделирования берутся, как правило, из экспериментальных исследований, либо из незначительного количества доступной литературы.

В настоящей статье приведены основные уравнения, используемые в программном обеспечении DEFORM для решения задач прогнозирования эволюции микроструктуры в процессе горячей штамповки.

Введение

В аэрокосмической промышленности, для производства ответственных деталей, таких как диски газотурбинных двигателей, широкое применение получили никелевые сплавы Waspalloy и Inconel 718. Связано это с их хорошими показателями сопротивления ползучести и усталости при повышенных температурах. Для получения оптимальных свойств деталей из этих сплавов решающим фактором является надежный и тщательный контроль размеров зерна. Так, мелкий размер зерна желателен вблизи ступицы для предотвращения образования и развития трещин, тогда как больший размер зерна предпочтителен в ободке для повышения сопротивления ползучести. В целях достижения желаемой микроструктуры, литые материалы обычно подвергаются нескольким этапам обработки, таким как билетировка и штамповка с последующей многостадийной термообработкой (отжиг и старение).

В процессе термомеханического воздействия на материал, по мере увеличения деформации, плотность дислокаций увеличивается. Накопленная при этом энергия может обеспечивать движущую силу различных восстановительных процессов, таких как возврат или рекристаллизация. Процесс рекристаллизации включает в себя зарождение бездислокационных зерен и их последующий рост. После завершения рекристаллизации, энергия может далее расходоваться на процесс роста зерен (собирательная рекристаллизация [1]), представляющий собой процесс укрупнения зерен, образовавшихся на стадии первичной рекристаллизации. Чем крупнее зерна, тем меньше суммарная поверхность границ зерен и тем меньше запас избыточной поверхностной энергии.

Кинетика рекристаллизации и роста зерен является сложной. Чтобы прогнозировать распределение размеров зерен в готовых деталях, необходимо понимание эволюции микроструктуры в процессе всего цикла производства, включающего в себя процессы первичной обработки (билетировка, прокатка или прессование), штамповки и

окончательной термической обработки. В последние годы, развитию моделей эволюции микроструктуры в программном комплексе DEFORM, компанией SFTC уделялось значительное внимание. Наиболее ранние работы [2-3] на эту тему фокусировались на горячей прокатке сталей из-за высокой экономической важности этих материалов. Кроме того, процессы прокатки могут быть смоделированы как установившиеся процессы, что значительно упрощает моделирование по сравнению с задачами штамповки. В середине 90-х были проведены работы по моделированию эволюции микроструктуры никелевых сплавов Waspalloy [4] и Inconel 718 [5,6]. Успех этих работ показал огромный потенциал использования компьютерного моделирования для проектирования производственных процессов и оптимизации зеренной структуры поковок и штамповок.

Модели рекристаллизации и роста зерен

Рекристаллизация бывает трех видов:

- Статическая рекристаллизация (SRX): рекристаллизация, которая происходит после деформирования, в процессе которого полученная степень деформации меньше некоторой критической степени деформации. Данный тип рекристаллизации происходит в местах, где отсутствуют зародыши рекристаллизации
- Метадинамическая рекристаллизация (MRX): рекристаллизация, которая происходит после деформирования в процессе которого полученная степень деформации больше некоторой критической степени деформации, поэтому рекристаллизация происходит из зародышей.
- Динамическая рекристаллизация (DRX): рекристаллизация, которая происходит во время деформирования в процессе которого полученная степень деформации больше некоторой критической степени деформации

Описание каждого вида рекристаллизации, также как и процесса стационарного роста зерен будет дано ниже.

Эволюция микроструктуры в никелевых суперсплавах усложняется выпадением γ' , γ'' и δ фазы [7]. Однако, настоящий феноменологический подход позволяет пренебречь эффектами, которые эти фазы оказывают на механизмы эволюции микроструктуры.

Статическая рекристаллизация (SRX)

Статическая рекристаллизация происходит после деформирования, в процессе которого полученная степень деформации меньше некоторой критической степени деформации ε_c .

$$\varepsilon_p = a_1 d_0^{n_1} \dot{\varepsilon}^{m_1} \exp(Q_1/RT) + c_1 \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = a_2 \varepsilon_p \quad (2)$$

Поскольку статическая рекристаллизация происходит через образование зародышей и их последующий рост, описанием отношения между до-

$$X_{SRX} = 1 - \exp \left[-\beta_s \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^{k_s} \right] \quad (3)$$

$$t_{0.5} = a_3 d_0^{h_3} \varepsilon^{n_3} \dot{\varepsilon}^{m_3} \exp(Q_3/RT), \quad (4)$$

в котором $t_{0.5}$ обозначает время, за которое происходит 50% рекристаллизации.

$$d_{SRX} = a_6 d_0^{h_6} \varepsilon^{n_6} \dot{\varepsilon}^{m_6} \exp(Q_6/RT) + c_6, \quad (5)$$

если $d_{SRX} > d_0$, тогда $d_{SRX} = d_0$

Метадинамическая рекристаллизация (MRX)

Метадинамическая рекристаллизация происходит, когда степень деформации по окончании

$$X_{MRX} = 1 - \exp \left[-\beta_m \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^{k_m} \right] \quad (6)$$

$$t_{0.5} = a_4 d_0^{h_4} \varepsilon^{n_4} \dot{\varepsilon}^{m_4} \exp(Q_4/RT) \quad (7)$$

$$d_{MRX} = a_7 d_0^{h_7} \varepsilon^{n_7} \dot{\varepsilon}^{m_7} \exp(Q_7/RT) + c_7, \quad (8)$$

если $d_{MRX} > d_0$, тогда $d_{MRX} = d_0$.

Динамическая рекристаллизация (DRX)

Динамическая рекристаллизация является, по своей сути, сложным процессом из-за одновременной генерацией дислокаций и их уничтожения путем рекристаллизации. Экспериментальные данные обычно собираются при различных степенях деформаций, скоростях деформации и

$$X_{DRX} = 1 - \exp \left[-\beta_d \left(\frac{\varepsilon - a_{10} \varepsilon_p}{\varepsilon_{0.5}} \right)^{k_d} \right] \quad (9)$$

$$\varepsilon_{0.5} = a_5 d_0^{h_5} \dot{\varepsilon}^{m_5} \exp(Q_5/RT) + c_5, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{0.5}$ обозначает деформацию при 50% рекристаллизации.

$$d_{DRX} = a_8 d_0^{h_8} \varepsilon^{n_8} \dot{\varepsilon}^{m_8} \exp(Q_8/RT) + c_8, \quad (11)$$

если $d_{DRX} > d_0$, тогда $d_{DRX} = d_0$

С точки зрения моделирования, очень сложно оценить развитие динамической рекристаллизации в процессе моделирования горячего де-

формирования. Критическая деформация обычно задается как доля пиковой деформации ε_p , при которой напряжение текучести достигает своего максимума (далее напряжение текучести начинает уменьшаться из-за динамической рекристаллизации, разупрочняющей материал). Значение ε_p определяется экспериментально и обычно является функцией скорости деформации, температуры и начального размера зерна, то есть,

лей рекристаллизованного объема и временем является кинетика изотермического отжига, обычно описываемая уравнением Аврами:

Размер рекристаллизованных зерен является функцией начального размера зерна, деформации, скорости деформации и температуры:

деформирования больше критической степени деформации. Метадинамическая рекристаллизация моделируется аналогично статической, но с другим набором констант материала:

температурах. Далее динамическая рекристаллизация моделируется феноменологически как функция деформации при фиксированной температуре и скорости деформации. Для описания соотношений между долей динамически рекристаллизованного объема материала и деформацией также используется уравнение Аврами:

Размер динамически рекристаллизованных зерен выражается как:

формирования. С этим связано то, что в программном комплексе DEFORM реализован подход, при котором рекристаллизация вычисляется непосред-

ственно *после* шага деформирования. При этом в качестве исходных данных используется средняя температура и скорость деформации данного шага моделирования.

Рост зерен

Моделирование роста зерен проводится для недеформируемого, в настоящий момент

$$d_{gg} = \left[d_0^m + a_9 t \exp\left(-\frac{Q_9}{RT}\right) \right]^{1/m} \quad (12)$$

Применение

Метод моделирования, воплощенный в выражениях (1) - (12) реализован в коде конечно-элементной модели DEFORM и широко применяется по всему миру, в том числе в работах Российских ученых и инженеров [8].

Очень распространенным видом операции заготовительного производства является протяжка. Целью этой операции является измельчение исходной микроструктуры заготовки перед последующей штамповкой. Процесс этот представляет собой большое количество локальных обжатий, в ходе которых диаметр заготовки уменьшается, а ее длина, соответственно, увеличивается. Очень важен для этой операции правильный режим нагрева, т.к. перегрев заготовки может вызвать значительный рост зерна, а недостаточных ее прогрев – возникновение трещин. Для прогнозирования эволюции микроструктуры заготовки, в данном случае, очень важен правильный выбор ковочной температуры, степени деформации и времени протекания процесса.

Для демонстрации возможностей программного обеспечения DEFORM компанией SFTC была произведена работа [9] по моделированию

материала, например, перед горячим деформированием или после завершения процесса рекристаллизации. Для этой цели используется классическое феноменологическое выражение, описывающее рост зерен:

эволюции микроструктуры при протяжке заготовки из никелевого сплава Inconel 718. Заготовка представляет собой шестигранник, длина стороны которого составляет 380 мм. Длина заготовки – 2 м. Процесс проходит без промежуточных подогревов за четыре прохода.

Конечно элементная модель, построенная в препроцессоре программного обеспечения DEFORM, представлена на рис. 1

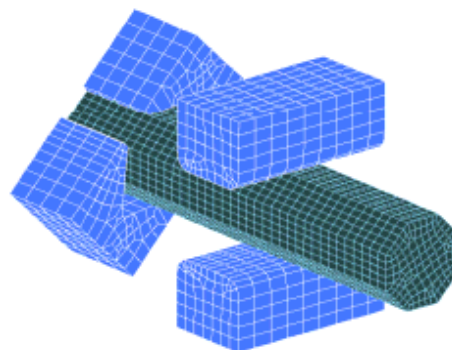


Рис. 1. Конечно элементная модель процесса протяжки заготовки из сплава Inconel 718

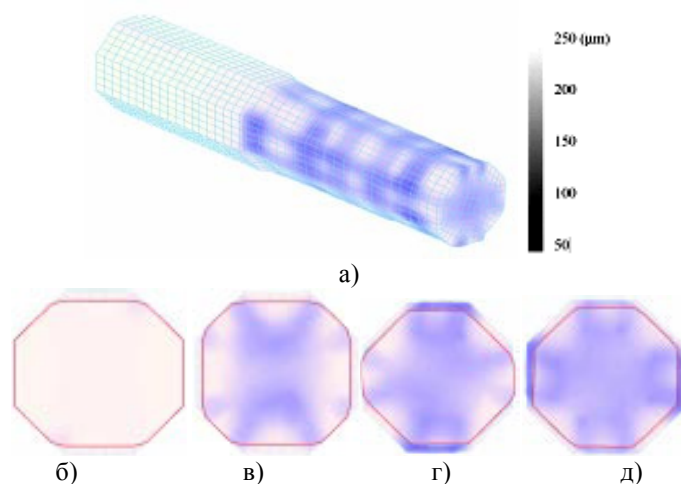


Рис. 2. Прогнозируемый размер зерна (а) на поверхности заготовки после четвертого прохода и по сечению заготовки после прохода номер (б) 1, (в) 2, (г) 3, (д) 4.

Заключение

На сегодняшний день программный комплекс DEFORM позволяет осуществлять моделирование эволюции микроструктуры при деформировании. Работы по совершенствованию математиче-

ских моделей и внедрению их в программный код DEFORM является одним из наиболее приоритетных направлений работы компании SFTC. Компания ТЕСИС (г. Москва, www.tesis.com.ru) является официальным представителем SFTC на территории Российской Федерации, стран СНГ и Балтии и

осуществляет весь комплекс работ по внедрению программного обеспечения DEFORM в производственный процесс предприятий и научно-исследовательский процесс ВУЗов.

Принятые обозначения

T – абсолютная температура
 R – газовая постоянная
 t – время
 d_0 – начальный размер зерна
 X_{srx} , X_{mrx} , X_{dtx} – величина рекристаллизовавшегося объема
 d_{srx} , d_{mrx} , d_{dtx} – размер зерна рекристаллизовавшегося объема
 d_{gg} – размер выросшего зерна
 ε – интенсивность деформации
 ε_c – критическая деформация
 ε_p – деформация, при которой напряжение текучести достигает своего максимума
 $\varepsilon_{0.5}$ – деформация, необходимая для рекристаллизации 50% объема материала
 $\dot{\varepsilon}$ – интенсивность скорости деформации
 $t_{0.5}$ – время, необходимое для рекристаллизации 50% объема материала
 Остальное – поправочные коэффициенты математической модели, определяемые экспериментально.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Б.Н. Арзамасов, В.И. Макаров, Г.И. Мухин и др.** Материаловедение: Учебник для ВУЗов. – Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Бауман, 2001 – 133 с.
2. **C. M. Sellars and J. A. Whiteman**, “Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling”, *Metal Science*, 13 (1979), 187-194.
3. **C. M. Sellars and G. J. Davis**, eds., *Hot Working and Forming Processes*, (London, UK: Metals Society, 1979), 3-15.
4. **G. Shen, S.L Semiatin, and R. Shivpuri**, “Modeling Microstructure Development during the Forging of Waspaloy”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26A (1995), 1795-1803.
5. **D. Zhao, et al.**, “Three Dimensional Simulation of Alloy 718 Ingot Breakdown by Cogging”, *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, ed. E. A. Loria, (Warrendale, PA: TMS, 1997), 163-172.
6. **A. J. Brand, K. Karhausen, and R. Kopp**, “Microstructural Simulation of Nickel Base Alloy Inconel 718 in Production of Turbine Discs”, *Materials Science and Technology*, 12 (1996), 963-969.
7. **J. W. Brooks and P. J. Bridges**, “Metallurgical Stability of Inconel Alloy 718”, *Superalloys 1988*, ed. S. Reichmann, et al. (Warrendale, PA: TMS, 1988), 33-42.
8. **N. V. Lopatin, O. N. Maradudina, and G. S. D'yakonov**, “Analysis of the Structure Formation and Properties of the VT6 Alloy during Upsetting of the Symmetrically Truncated Conical Billets”, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2011, Vol. 52, No. 1, 33-38.
9. **D. Huang, W.T. Wu, D. Lambert, S.L. Semiatin** “Computer Simulation of Microstructure Evolution during Hot Forging of Waspaloy and Nickel Alloy 718”